해프톤 도트 분포 분석 및 주파수 피크 위치 정제에 의한 해프톤 셀 정보 추정

한영미[†] · 김민환[††]

요 약

역 해프토닝(inverse halftoning)의 성능을 향상시키기 위해서는 최적의 평활화 마스크(mask)가 생성되어야 하고, 최적의 평활화 마스크를 생성하기 위해서는 정확한 해프톤 셀 정보가 구해져야 한다. 본 논문에서는, 클러스터드 도트(clustered dot) ordered dither 방법으로 해프토닝된 일반적인 인쇄물 영상을 주 대상으로 해프톤 셀 정보의 정확성을 판정하기 위한 최소 에너지를 정의하고, 퓨리에 공간에서의 피크 형태 분석 및 여러 가지 함수에 의한 피크 모델링을 통해, 제한된 탐색구간에서 차원분해(dimension decomposition)의 방법을 적용하여 보다 정확하게 근사화된 해프톤 셀 정보를 효율적으로 추출하는 방법을 제안한다. 제안한 방법으로 구한 해프톤 셀 정보를 이용해서 영상의 전체 영역에 대한 해프톤 셀 중심(seed)을 정확하게 추출하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 제안한 방법은 퓨리에 공간의 피크 정보를 이용한 텍스쳐 패턴 분석, 칼라 해프톤 영상의 채널분리 및 모아레 패턴 존재 영역 판정 등에 유용하게 활용할 수 있다.

Estimation of Halftone Cell Information by Analyzing Distribution of Halftone Dots and Refining Location of Their Spectral Peaks

Youngmi Han[†] and Minhwan Kim[††]

ABSTRACT

To improve the performance of the inverse halftoning, smoothing masks should be designed optimally by using the accurate information of halftone cells. In this thesis, the method of energy minimization is so defined as to determine the exact information of halftone cell. A heuristic search method is proposed to obtain efficiently the parameters of halftone cells which determine the minimum energy. A halftone-peak modeling method with several functions is proposed and used to get initial values of the parameters. The dimension decomposition technique is also adopted to speed up the search process of energy minimization. Several experiments show that the proposed method extracts correct location of the seed pixel of the halftone cell and the extracted information of the halftone cell can be used to get more exactly smoothed color images. The proposed method can be applied to extract the texture patterns, to separate channel images of a scanned color halftone image, and to extract the moire area in an image.

1. 서 론

프린터와 같은 이진화 장비를 이용해서 연속계조 영상(continuous tone image)을 처리할 때, 공간 융합(spatial integration)의 시각적인 특성에 의해 톤(tone)의 변화가 연속적으로 보이도록 이진화된 화소 분포를 조정해서 처리하는 방식을 해프토닝(halftoning)이라고 한다[1,2]. 해프토닝된 인쇄물을 스캐닝(scanning)한 영상은 해프토닝 과정의 왜곡(distortion)으로 인해 멀티미디어 저작, 전자도서관, 영상데이터베이스 등과 같은 응용분야에서 그대로 활용하기 어렵다. 그 문제점으로는, 해프토닝시의 해상도와

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30300-002-3) 지원으로 수행되었음.
† 준회원, 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정
†† 종신회원, 부산대학교 컴퓨터공학과 교수

스캐닝시의 해상도가 정수 비례가 아닐 경우, 영상의 크기를 변환하면 원하지 않는 패턴이 발생하며, 이진화된 해프톤 도트(halftone dot) 형태가 그대로 존재하기 때문에, 불필요한 에지성분 추출이나 과다한 영역분할(segmentation)의 요인이 되며, 모니터 상에서 연속계조영상과 같은 양질의 영상을 서비스 할 수 없다. 뿐만 아니라 해프토닝 과정에 포함되는 고주파 성분으로 인해 인접하는 화소간의 값 차이가 크고 화소값의 변화가 빈번하여 압축율 저하를 초래한다. 그러므로, 스캐닝된 해프톤 영상을 연속계조영상으로 복원(restoration)하는 것이 필수적인데, 이 과정을 역 해프토닝(inverse halftoning)이라고 한다[3-5].

스캐닝된 해프톤 영상의 역 해프토닝 방법은 해프토닝된 방법에 따라 결정된다. 에러 확산(error-diffusion) 방법[6]의 해프톤 영상은 에러확산 커널(kernel)[7]을 추정하는 방법을 주로 이용하고, ordered-dither 방법[1,8]의 해프톤 영상은 저주파 필터링을 이용하되 고주파 성분을 보존하기 위한 방법에 따라 다양한 방법이 연구되어 있다. 이 중에서 해프톤 셀(half tone cell)의 크기 및 각도를 추정해서 역 해프토닝 하는 방법[3,9-12]은 해프톤 패턴의 특성을 고려함으로써 보다 우수한 성능을 보이고 있다.

클러스터드 도트 ordered-dither 방법으로 해프토닝된 일반적인 인쇄물 해프톤 영상의 역 해프토닝 방법에서는, 먼저 퓨리에 공간의 3, 4 상한에서 해프톤 피크(peak)의 좌표 및 복소수 값을 이용해서 영상공간의 해프톤 셀 크기, 각도 및 영상의 원점에서 첫 번째 해프톤 셀 중심까지의 거리인 오프셋(offset)을 구한다[3]. 이때, 퓨리에 공간에서의 피크좌표를 보다 정확하게 구하면, 해프톤 셀 정보를 보다 정확하게 추정할 수 있으며, 퓨리에 공간의 피크 성분을 효과적으로 제거할 수 있는 최적의 평활화 마스크를 만들 수 있다. 이에 따라, 역 해프토닝 결과영상의 질도 보다 향상시킬 수 있다.

퓨리에 공간에서 해프톤 셀 정보를 추출하는 기존의 방법으로는 정수 피크좌표를 이용하는 방법[3], 평활화 마스크를 퓨리에 변환한 후 영교차(zero crossing)가 해프톤 영상에 대한 퓨리에 스펙트럼의 피크를 통과하도록 평활화 마스크의 크기를 조정하는 방법[9,10], 퓨리에 공간에서 주 피크(base peak)의 상위차수(high order) 피크에 대한 정수 좌표를 이용하는 방법[3], 가우시안 보간법에 의한 실수 피크좌표를 이용하는 방법[3] 등이 있다. 정수 피크좌표를 이용해서 평활화 마스크를 만들면, 평활화 마스크에 대한 퓨리에 스펙트럼의 영교차가 스캐닝된 해프톤 영상에 대한 퓨리에 스펙트럼의 피크를 지나지 않을 수 있으므로 해프톤 패턴을 완전하게 제거하지 못한다. 결국 정수 피크좌표에 의한 평활화 마스크는 평활화 성능이 떨어져 역 해프토닝 후에도 해프톤 셀 패턴이 잔존하게 된다. 퓨리에 공간에서 평활화 마스크의 영교차가 피크를 통과하도록 조정하는 방법은 셀 크기만 조정되었으므로 셀 각도에 대한 정확성을 보장할 수 없으며, 셀 각도가 조정될 경우 셀 크기 또한 조정되어야 하는 문제점이 있다. 주 피크의 상위차수 피크를 이용하는 방법은 피크의 정확한 위치를 찾기 어려워 현실적으로 사용하기가 어렵다. 가우시안 보간법을 이용한 방법은 실수 피크좌표 값을 활용할 수 있어 다른 방법에 비해 정확성이 보다 높지만, 피크가 항상 가우시안 분포를 따르는 것이 아니므로 이 방법 또한 정확한 피크좌표를 구한다고 할 수 없다. 뿐만 아니라 영상공간의 값으로 변환할 때 발생하는 절삭오차(truncation error)로 인해 높은 정밀도를 요구하는 정확한 셀 정보를 구하기가 어렵다.

이에, 본 논문에서는 실제 대량의 인쇄물에서 주로 사용되는 클러스터드 도트 ordered-dither 방법으로 해프토닝된 인쇄물 영상을 주 대상으로, 밝기 값이 높은 영역의 경우에도 해프톤 도트의 중심화소는 인쇄된다는 해프토닝 특성을 반영한 정확한 해프톤 셀 정보의 판정 기준이 되는 최소 에너지를 정의하며, 최소 에너지탐색 공간 및 횟수를 최소화하면서 최적의 해프톤 셀 정보를 찾기 위해 휴리스틱(heruistic)한 차원분해 방법을 제안한다. 제안한 방법은 오프셋 (x0, y0), 셀 크기 및 셀 각도에 대한 4차원의 탐색공간을 성질이 유사한 2차원으로 분리하여 두 번에 걸쳐 탐색하게 되는데, 우선 에너지 변화가 급격하여 최적값을 결정하기 용이한 오프셋을 먼저 결정한다. 이때, 퓨리에 공간에서 피크 형태를 가우시안 함수, 지수함수, 직선함수 등으로 모델링하여 얻어진 피크 좌표를 이용해 셀 크기 및 각도의 초기값으로 고정한다. 결정된 오프셋을 고정한 다음, 탐색을 통해 최소 에너지 상태의 해프톤 셀 크기 및 각도를 결정하는 것이 1차 탐색단계 이다. 1차 탐색단계의 결과를 기반으로 보다 제한된 탐색 구간과 세분화된 변화율로 4차원 공

간의 상세 탐색을 통해 최적의 오프셋, 셀 크기 및 셀 각도를 결정한다.

본 논문의 구성은, 먼저 2장에서는 해프톤 셀 정보의 특성에 대해 살펴보고, 3장에서 본 논문에서 제안하는 최적의 해프톤 셀 정보 판정 기준 및 피크 형태의 모델링에 의해 제한된 탐색 구간에서 최적의 해프톤 셀 정보를 추출하는 방법을 설명한다. 4장에서는 정확한 해프톤 셀 정보 판정 방법 및 탐색을 통한 해프톤 셀 정보 추출 방법의 타당성을 실험을 통해 분석하고, 5장에서 결론 및 향후 연구 방향에 대해 기술한다.

2. 해프톤 셀 정보의 특성

해프톤 영상에 대한 퓨리에 스펙트럼에는 해프톤 패턴에 의한 많은 고주파 성분이 포함되어 나타나며, 규칙적인 해프톤 패턴으로 인해 피크가 형성되어 나타난다. 그림 1(a),(b)는 그레이 값을 변화시키면서 49개의 블록으로 나타낸 연속계조영상과 퓨리에 변환 결과이고, 그림 1(c),(d)는 포토샵 5.0을 이용하여 셀 크기 및 각도를 각각 7과 15°로 해서 해프토닝한 결과와 퓨리에 변환 결과를 나타내고 있다. 그림 1(b)에서는 큰 주파수 성분 값이 반복되는 블록 패턴과 영상경계에서의 불연속성으로 인해, 주로 수직 및 수평 좌표축에 나타나는 반면에, 그림 1(d)에서는 해프톤 패턴의 규칙적인 배열 및 해프톤 도트 경계에서의 불연속성으로 인해 많은 피크가 나타나 있다.

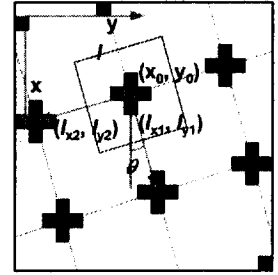
그림 1(d)의 원점 부분을 확대한 그림 2(a)에서, 3상한 및 4상한에서의 주 피크(main peak)에 대한 좌표(u_1, v_1)과 (u_2, v_2) 및 피크의 복소수 값은 그림

(a) 퓨리에 공간 (b) 영상공간

그림 2. 스펙트럼 피크와 해프톤 셀 정보

2(b)에서와 같은 해프톤 도트간의 위치 변화량 (l_{x1}, l_{y1})과 (l_{x2}, l_{y2}), 오프셋 (x0, y0), 해프톤 셀 크기(l) 및 각도(θ)를 구하는데 사용할 수 있다[3,9].

해프톤 패턴을 평활화하기 위한 영상공간에서의 평활화 마스크(mask)는 구해진 해프톤 셀의 크기 및 각도와 동일한 모양의 마스크를 이용하면 매우 효과적인 평활화 결과를 얻을 수 있다. 이 마스크에 대한 퓨리에 변환 결과는 그림 3(a)와 같이 sinc 함수로 나타나며, 해프톤 패턴에 의한 모든 피크들을 효과적으로 제거해 준다. 그림 3(b)는 그림 1(c)를 평활화한 결과이며, 한 블록 부분을 일부 확대한 그림 3(c)에서와 같이 매우 효과적으로 평활화 해 준다.

여기에서, 평활화 마스크의 크기와 각도는 피크좌표로부터 전적으로 계산되는 것이므로, 평활화 성능은 피크 정보의 정확성과 매우 관련이 있음을 알 수 있다. 정확한 피크좌표는 실수 값으로서, 정수 값으로 간략화 하여 사용하거나 부정확한 해프톤 셀 크기 및 각도 정보를 사용한 경우에는 그림 4에서와 같이 평활화 성능이 매우 떨어진다.

(a) 연속계조영상 (b) 연속계조영상의 퓨리에 특성 (c) 해프톤 영상 (d) 해프톤 영상의 퓨리에 특성

그림 1. 연속계조영상 및 해프톤 영상의 퓨리에 특성 비교

(a) 평활화 마스크의 퓨리에 변환 결과

(b) 그림 1(c)의 평활화 결과

(c) 평활화 결과의 일부분 확대

그림 3. 평활화 마스크에 의한 평활화 결과

(a) 정수피크좌표에 의한 평활화 결과

(b) 부정확한 해프톤 셀 크기에 의한 평활화 결과

(c) 부정확한 해프톤 셀 각도에 의한 평활화 결과

(d) (a)의 부분확대

(e) (b)의 부분확대

(f) (c)의 부분확대

그림 4. 부정확한 피크 정보에 의한 평활화 결과

표 1은 정확한 해프톤 셀 정보와 부정확한 해프톤 셀 정보를 사용했을 때의 셀 크기 및 각도를 나타내고 있다. 부정확한 해프톤 셀 크기는 퓨리에 공간에서 피크화소에 의한 4 꼭지점의 좌표값으로 계산한 결과 중 최대 값을 이용하였고, 셀 각도는 셀 크기의 변화량에 해당하는 정도의 셀 각도를 환산하여 정확한 셀 각도에 더한 값을 이용하였다. 여기에서, 정확한 해프톤 셀 크기 및 각도는 인위적으로 해프토닝한 영상(그림 1(c))을 이용하여 영상공간에서 직접 구한 것으로서, 포토샵 5.0에서 정수 파라미터로 준 크기 7과 각도 15°와는 달리 7.2801($=\sqrt{(l_{x1}^2+l_{y1}^2)}$)과 15.9454°($=atan^{-1}(l_{y1}/l_{x1})$)의 실수 값으로 각각 나타난다. 그 이유는 실제 해프토닝 과정에서는 디지털화한 스크린 마스크를 이용하여 화소 위치별로 연산을 하기 때문이다. 밝기 값을 조정하여 해프톤 셀 중

표 1. 해프톤 셀 크기 및 각도 비교

그 림	사용 셀 정보	셀 크기	셀 각도
그림 3	정확한 셀 정보	7.2801	15.9454
그림 4(a)	정수 피크에 의한 셀 정보	7.3219	15.7793
그림 4(b)	부정확한 셀 크기	7.4175	15.9454
그림 4(c)	부정확한 셀 각도	7.2801	27.0952

심만 인쇄된 해프톤 영상(그림 5)을 이용해서 영상공간에서 실제로 구한 셀 크기 및 각도를 살펴보면, 각도에 따라 해프토닝 과정의 정수 파라미터 값과 달리 실수 값으로 구해지는 것을 확인할 수 있다.

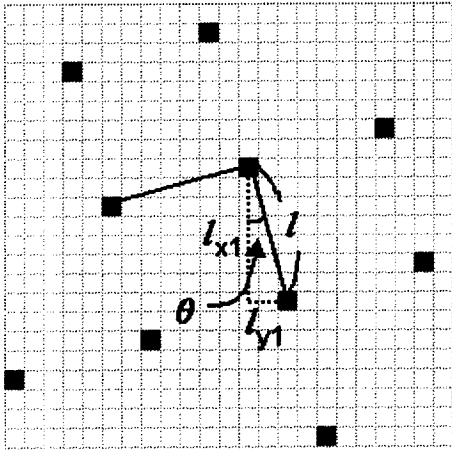



그림 5. 해프토닝시 파라미터에 따른 해프톤 셀 중심의 분포

역 해프토닝을 위한 평활화 마스크는 영상공간에서 화소단위의 연산이므로 오프셋과는 무관하며 해프톤 셀 크기 및 각도에 의해서만 결정되므로, 흑백 해프톤 영상의 경우 인쇄 및 스캐닝시 다소 왜곡이 발생하더라도, 해프토닝시의 분판과 유사한 형태를 유지하고 있다. 따라서, 정확한 해프톤 셀 크기 및 각도를 이용한 평활화 마스크로 역 해프토닝을 하게 되면 해프토닝 이전의 연속계조영상에 근접한 영상으로 복원할 수 있다. 그러나 칼라 해프톤 영상의 경우, 중첩 인쇄와 스캐너의 조명성분으로 인한 색상변화 등과 같은 복합적인 왜곡으로 인해 해프토닝시의 분판과 유사한 채널영상으로 분리하지 못한다. 오분류된 화소로 형성된 채널영상은 역 해프토닝시 평활화 성능이 떨어지게 된다[3,10,11]. 그러므로, 칼라 해프톤 영상에 대한 역 해프토닝 성능을 향상시키기 위해서는 채널영상이 보다 분판에 가까운 형태로 분리되어 각 채널영상별로 최적의 평활화 마스크를 생성해야 한다. 이때, 오프셋까지 고려한 정확한 해프톤 셀 정보를 이용해서 구한 해프톤 셀 중심을 기반으로 해프톤 도트를 추출하면 보다 분판에 가까운 채널영상 분리가 가능하다.

그림 6은 표 2에서와 같이 정확한 셀 정보와 부정확한 셀 정보를 이용했을 경우에 대한 해프톤 셀 중심을 표기한 것으로, 보다 정확한 해프톤 셀 정보의 중요성을 명확히 알 수 있다. 표 2에서 해프톤 셀 중심 화소의 평균 밝기를 살펴보면, 정확한 해프톤 셀 정보를 이용했을 경우의 평균 밝기 값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 이것은 해프토닝 과정에서 아무리 작은 해프톤 도트가 생성되더라도 해프톤 셀 중심에 해당하는 화소는 거의 대부분 인쇄되기 때문이다. 이러한 특성은 3장에서 정확한 해프톤 셀 정보를 탐색할 때 활용할 수 있다. 한편, 부정확한 오프셋의 경우, 평균 밝기값이 가장 높은 값을 가지게 된다. 이것은 부분적으로 해프톤 셀 중심위치를 잘못 찾은 것이 아니고 전체 영상에서 전반적으로 모두 잘못된 셀 중심을 찾기 때문이다.

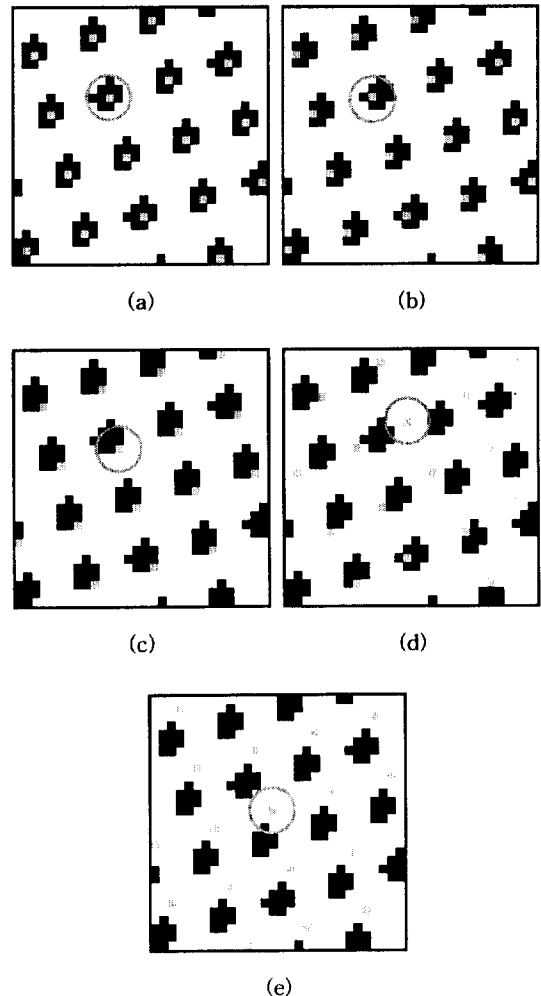



그림 6. 해프톤 셀 정보에 따른 해프톤 셀 중심

표 2. 해프톤 셀 정보 및 중심 화소 평균 밝기값

셀정보 / 그림	사용 셀정보	셀크기	셀각도	오프셋		해프톤 셀 중심 평균 밝기값
				x0	y0	
그림 6(a)	정확한 셀 정보	7.2801	15.9454	1.2752	1.2472	0.0052
그림 6(b)	정수피크에 의한 셀 정보	7.3219	15.7808	1.2752	1.2472	0.0267
그림 6(c)	부정확한 셀 크기	7.4175	15.9454	1.2752	1.2472	0.6174
그림 6(d)	부정확한 셀 각도	7.2801	27.0952	1.2752	1.2472	0.5199
그림 6(e)	부정확한 오프셋	7.2801	15.9454	4.9153	4.8872	0.8859

3. 새로운 해프톤 셀 정보 추출 방법

3.1 정확한 해프톤 셀 정보 판정 기준

그림 7(a)는 클러스터드 도트 ordered dither 방법에 의한 해프톤 도트의 크기가 결정되는 순서를 나타낸다. 즉, 화소 밝기 값이 커서 한 점만이 인쇄되는 경우에는 중심화소(원 부분)만이 인쇄되며, 점점 낮은 밝기 값을 가질수록 중심화소를 기준으로 원형으로 커지도록 되어 있다. 해프톤 셀의 크기, 각도, 오프셋이 정확하게 구해지면, 해프톤 셀의 중심위치가 해프톤 도트들의 중심화소의 위치와 일치하므로, 해프톤 셀 중심화소의 밝기 값의 합은 매우 작은 값을 갖게 된다. 만약 해프톤 셀 정보가 부정확하면, 해프톤 도트의 중심화소 위치와 해프톤 셀의 중심위치가 일치하지 않는 경우가 많이 발생하여, 해프톤 셀 중심화소의 밝기 값의 합에는 밝기 값이 높은 주변화소의 값이 포함되어 높은 값을 갖게 된다. 이에, 정확한 해프톤 셀 정보에 대한 판정 기준으로 해프톤 셀 중심 화소의 평균 밝기 값을 식 (1)과 같이 정의하여 이용하는 것을 제안한다.

$$E=\frac{1}{N}\sum_{p_i\in S} f(p_i),\quad 0\le f(p_i)\le 1 \qquad (1)$$

수식에서 N, p_i, 및 $f(p_i)$는 전체 영상에서 해프톤 셀 중심의 개수, 해프톤 셀 중심 위치, 그리고 그 위치에서의 밝기 값을 각각 나타낸다. 해프톤 셀 중심 화소의 평균 밝기 값을 해프톤 셀의 중심이 안정적인 상태 여부를 나타낸다는 의미로서 에너지라는 용어를 사용할 때, 이 에너지가 최소 값을 가질 때를 영상 내의 모든 해프톤 셀 중심을 가장 정확하게 찾은 것으로 추정한다. 칼라 해프톤 영상에 대해서는 채널 영상별로 이 에너지를 최소화하는 해프톤 셀 정보를 찾으면 된다.

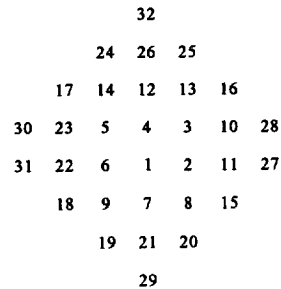
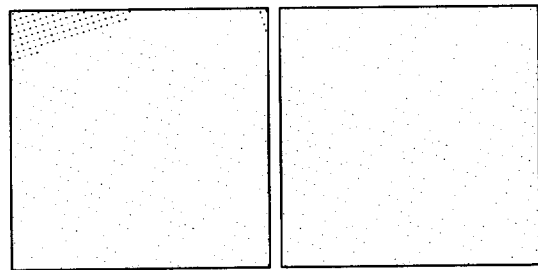
그림 7(b)는 해프톤 도트의 중심화소만이 인쇄되도록 밝기 값을 조정하여 해프토닝한 인위적인 해프톤 영상에 대하여, 부정확한 해프톤 셀 정보에 의한 해프톤 셀의 중심위치와 에너지를 나타낸 것이다. 여기에서, 진하게 나타난 점들은 해프톤 도트의 중심화소와 해프톤 셀의 중심위치가 제대로 일치하지 못한 경우를 나타내며, 흐리게 나타난 부분은 잘 일치된 경우를 나타낸다. 그림 7(c)는 에너지가 최소가 되어 해프톤 셀 정보가 잘 구해진 경우를 나타내는 것으로서, 식 (1)과 같이 정의된 에너지가 최소가 될 때의 해프톤 셀 정보를 정확한 정보로 추정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

(a) 해프톤 도트 인쇄 순서

(b) 에너지 : 0.0604 (c) 에너지 : 0.0

그림 7. 해프톤 도트 인쇄 순서 및 해프톤 셀 중심과 에너지의 관계

3.2 피크형태 분석을 통한 탐색 구간 결정

에너지를 정확한 셀 정보에 대한 판정 기준으로 이용하는 것이 타당하므로, 그 값이 최소가 되는 셀 정보를 찾기 위한 탐색 구간 및 변화율을 결정해야 한다. 이산 퓨리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)을 통해 피크좌표를 구할 경우에, 피크좌표는 정수 단위로 얻게 된다. 따라서, 퓨리에 공간에서 피크로 결정된 화소의 4 꼭지점에 의한 영역을 피크가 존재할 수 있는 최대 영역(그림 8)으로 볼 수 있다. 만약 정확한 피크의 위치가 피크 화소에서 벗어날 경우, 퓨리에 공간에서 피크 좌표가 변경될 것이므로 정확한 피크 위치는 피크 화소를 벗어날 수 없다. 따라서 가장 기본적인 탐색 방법은 피크 화소에 대한 4개의 좌표값(ABCD)에 의해 계산되는 해프톤 셀 크기 및 각도(표 3)의 최대 값과 최소 값을 이용해서 탐색구간을 결정하는 것이다.

그림 8. 기본적인 피크 탐색영역

표 3. 피크화소 영역에 의한 해프톤 셀 정보

	피크 좌표	셀 크기	셀 각도(°)
탐색영역	A	7.3746	16.5241
	B	7.4175	15.3610
	C	7.2688	15.0459
	D	7.2284	16.1918

앞에서 언급한 바와 같이 퓨리에 공간에서 피크좌표는 정수좌표로 얻게 되므로, 정확한 피크 위치에 대한 정수 좌표의 정밀성은 식 (2)와 같은 관계식에 의해 영상공간에서의 샘플링 간격에 매우 좌우된다. 식 (2)에서 Δx 및 N은 영상공간에서의 샘플링 간격 및 횟수이며, Δu는 퓨리에 공간에서 주파수 성분 간격을 나타낸다.

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x} \qquad (2)$$

여기에서, 피크 위치에 대한 정밀성은 Δu가 작은 경우에 높아지므로, N을 증가시키거나 Δx를 줄이면 보다 정확한 피크 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그러나, 주어진 해프톤 영상에 대해 해상도를 높여서 스캐닝 하더라도 Δu를 줄일 수 없다. 스캐닝 해상도를 높여서 샘플링 횟수를 증가시키는 효과는 얻을 수 있으나, 해상도가 높아짐에 따라 Δx가 그 비율만큼 작아지므로 주파수 성분 간격은 변함이 없게 되기 때문이다. 따라서, 다른 방법으로서 피크 주변의 분포 정보를 활용하는 방법이 있을 수 있다[3]. 예를 들어, 그림 9(a)에서와 같이 수직방향의 1차원 스펙트럼에서 정수 피크 위치(222)를 중심으로 주변의 값이 분포되어 있는 경우에, 아래쪽 위치(223)의 값이 위쪽 위치(221)의 값보다 크므로 보다 정확한 피크 위치는 아래쪽으로 어느 정도 이동함을 알 수 있다. 마찬가지로, 수평방향의 1차원 스펙트럼에서도 정확한 피크의 위치는 오른쪽으로 이동함을 알 수 있다. 결국, 2차원 공간에서 피크가 존재할 수 있는 제한된 영역은 피크화소의 우측 하단으로 제한되어 그림 10에서 3상한과 4상한의 a,b,c,d로 나타낼 수 있다. 표 4는 퓨리에 공간에서 제한된 영역(abcd)에 대한 피크좌표를 이용해서 계산된 해프톤 셀 크기 및 각도이다. 표 5에서는 피크 화소 전체 영역에 대한 탐색 구간과 제한된 영역에 대한 탐색 구간을 비교한 것으로, 피크화소 전체 영역의 탐색 구간 보다 제한된 영역의 탐색 구간이 1/2 정도로 감소되어 효율적인 탐색이 가능함을 알 수 있다.

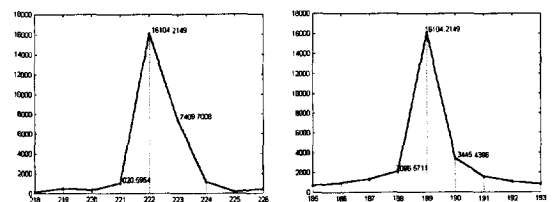
피크화소에서 제한된 영역을 선택하더라도, 오프셋 x0, y0, 셀 크기와 각도 등 4차원 공간의 탐색이기

(a) 수직방향의 피크 주변 (b) 수평방향의 피크 주변

그림 9. 피크 위치 주변의 스펙트럼 분포

그림 10. 제한된 피크 탐색영역

표 4. 제한된 영역에 대한 해프톤 셀 정보

	피크 좌표	셀 크기	셀 각도(°)
탐색영역	a	7.3007	16.3522
	b	7.3219	15.7793
	c	7.2489	15.6188
	d	7.2284	16.1861

표 5. 피크 화소영역과 제한된 영역에 대한 탐색구간 비교

셀 정보	탐색영역	최소값	최대값	탐색구간
셀 크기	ABCD	7.2284	7.4175	0.1891
	abcd	7.2284	7.3219	0.0935
셀 각도(°)	ABCD	15.0459	16.5241	1.4782
	abcd	15.6188	16.3522	0.7334

때문에 탐색횟수가 $O(n^4)$이 된다. 따라서 탐색횟수를 줄이기 위한 휴리스틱한 방법으로 특성이 유사한 오프셋 정보 x0, y0와 셀 크기 및 각도의 2차원 정보로 각각 나누어 탐색하는 차원분해의 방법을 이용하면, 탐색횟수를 $O(n^2)$로 줄일 수 있다. 표 6은 인위적인 해프톤 영상(그림 1(c))에 대한 차원 분해 전후의 탐색횟수를 비교한 것으로 차원분해로 인한 연산 이득을 확인할 수 있다.

표 6. 제한된 영역의 셀 정보 탐색구간 및 탐색횟수

		최소값	최대값	변화량	탐색횟수		
					단일차원	차원 분해전	차원 분해후
오프셋	x0	-0.024755	3.6610	0.6	6	43,008	1,066
	y0	-1.252792	3.6610	0.5	7		
셀 크기		7.2284	7.3219	0.0029	32		
셀 각도		15.6188	16.3522	0.0230	32		

3.3 1차 탐색에 의한 해프톤 셀 정보 추출

3.3.1 오프셋 정보 추출

오프셋 값을 탐색에 의해 구하기 위해서는 셀 크기 및 각도가 고정된 값을 가져야 한다. 퓨리에 공간의 제한된 영역에 의해서는 셀 크기와 각도에 대한 탐색구간은 결정할 수 있지만 고정된 값을 결정할 수 없다. 따라서, 보다 타당한 값으로 셀 크기 및 각도를 고정하기 위해, 피크 형태를 모델링해서, 그 결과 얻어진 피크좌표에 의한 셀 크기 및 각도로 에너지를 계산한다. 이때, 식 (1)에서의 에너지가 최소가 되는 셀 크기 및 각도를 오프셋을 구하기 위한 고정된 값으로 이용한다.

피크 형태를 모델링 하여 실수 피크 위치를 추정하는 함수로는, 식 (3)과 같은 가우시안 함수[3]가 있다(그림 11(a)). 본 연구에서는 식 (4),(5)와 같이 지수 함수(그림 11(b)) 및 직선 함수(그림 11(c))를 제안한다.

$$g(u) = c\, e^{-d(u-p)^2} \tag{3}$$

$$e(u) = c\, e^{-d|u-p|} \tag{4}$$

$$f_1(u) = au + b_1 \quad f_2(u) = -au + b_2 \tag{5}$$

가우시안 함수 및 지수 함수로 모델링 하는 방법에서는 정수 피크 위치의 스펙트럼 값(㉮)과 좌우로 인접한 위치의 스펙트럼 값(㉯,㉰)을 이용해서 모델링 함수의 파라미터 c, d를 결정할 수 있으며, 최대값을 갖는 위치 p를 보다 정확한 피크좌표로 추정한다. 직선 함수로 모델링 하는 경우에는, ㉮와 ㉰를 이용해 기울기 a와 b1을 구하고, ㉯를 이용해 b2를 구하고, 피크좌표는 두 직선의 교차점으로부터 구할 수 있다. 지수 함수로 모델링 하는 경우에 피크좌표 p를 구하기 위한 보정값 u_{corr}은 다음과 같이 구할 수 있다. 여기에서, ㉮,㉯,㉰는 스펙트럼 값의 크기 순서로 나타낸 것이며, 이들의 위치를 각각 i, i+1, i-1로 표기한 것이다. 만약 ㉯와 ㉰의 위치가 좌우로 바뀐 경우에는, u_{corr}의 부호를 바꾸어 주면 된다. 그림 11(d)는 피크 좌표의 보정값 u_{corr}을 나타낸 것이다.

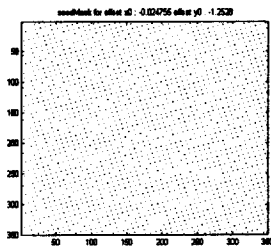
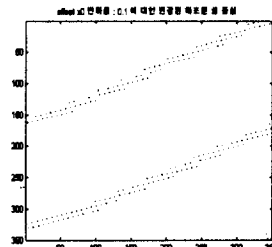
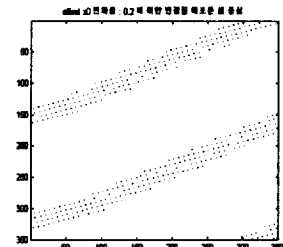
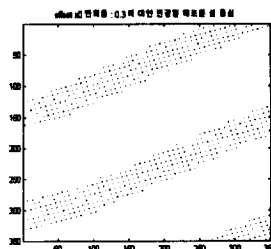
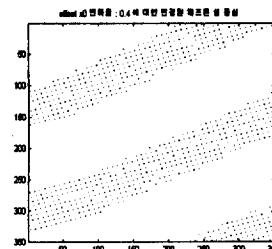
$$\begin{aligned}
&e(u) = c\, e^{-d|u-p|} \\
&\ln e(u) = \ln c - d|u-p| \\
&0 < u_{corr} = p - i < 1 \\
&\ln \text{㉮} = \ln c - d\,|i-p| = \ln c - d u_{corr} \\
&\ln \text{㉯} = \ln c - d|-u_{corr}+1| = \ln c - d(-u_{corr}+1) \\
&\ln \text{㉰} = \ln c - d|-u_{corr}-1| = \ln c - d(u_{corr}+1)
\end{aligned}$$

(a) 가우시안 함수 (b) 지수 함수 (c) 직선 함수 (d) 피크좌표 보정값

그림 11. 피크 모델링 방법 및 피크좌표 보정값

$$q_{u2} = \ln \frac{㉮}{㉰} = d$$
$$q_{u1} = \ln \frac{㉮}{㉯} = d(-2du_{corr}+1)$$
$$q_{u2} - q_{u1} = 2d\,u_{corr}$$
$$u_{corr} = \frac{q_{u2}-q_{u1}}{2q_{u2}} = \ln \frac{㉯}{㉰} / \ln \frac{㉮}{㉰}$$

피크 모델링 결과를 이용해서 셀 크기 및 각도값이 고정되면, 오프셋의 탐색 구간과 변화율을 결정해야 한다. 오프셋의 탐색 구간은 계산에 의해 구한 초기 오프셋 값부터 최대 셀 크기의 1/2까지로 한다. 먼저 x 방향에 대한 오프셋의 변화율을 구하기 위해, 셀 크기, 각도 및 피크 위치의 복소수 값에 의해 계산된 y 방향의 초기 오프셋을 고정시킨 채, x 방향의 오프셋을 0.1 씩 증가시키면서 구한 셀 중심이 초기 셀 정보에 의한 셀 중심의 위치보다 50%이상 변경될 때를 x 방향의 오프셋 변화율로 결정한다. 그림 12는 x 방향의 오프셋 변화율을 증가시킴에 따라 셀 중심 위치가 변경되는 정도를 보인 것이다. y 방향에 대한 오프셋의 변화율도 동일한 방법으로 결정한다.

탐색구간과 변화율이 결정되면 오프셋의 최적값을 찾는 과정은 두 단계로 나누어지는데, 첫째 단계

(a) 초기 오프셋 값을 이용한 셀 중심 (b) 오프셋 변화율 : 0.1 (c) 오프셋 변화율 : 0.2

(d) 오프셋 변화율 : 0.3 (e) 오프셋 변화율 : 0.4 (f) 오프셋 변화율 : 0.5

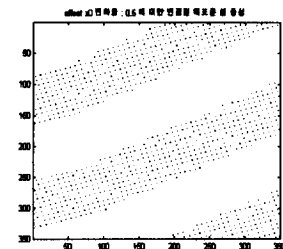
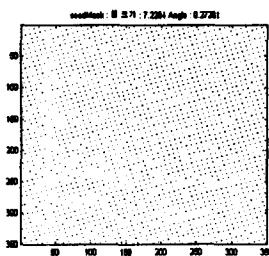
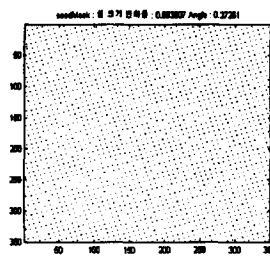
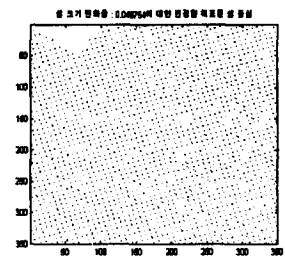
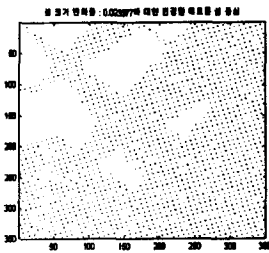
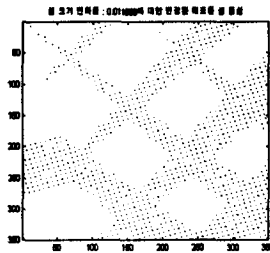



그림 12. 오프셋 변화율에 따라 변경된 셀 중심

에서는 셀 크기 및 각도를 고정한 채 최소 에너지 상태의 오프셋 값을 찾는 것이다. 그러나 고정된 셀 크기 및 각도가 피크 모델링에 의한 피크 좌표를 이용한 것이기 때문에 최적의 셀 크기 및 각도임을 보장할 수 없으므로, 오프셋 값을 최적값으로 판정할 수 없다. 따라서, 둘째 단계에서는 최적값으로 판정된 오프셋 위치±변화율과 변화율/2로 탐색구간 및 변화율을 변경한 후, 모델링에 의한 실수 피크와 정수 피크로 계산된 셀정보를 이용해서 에너지를 다시 구한다. 그 중 최소 에너지가 될 때의 오프셋을 1차 탐색 단계의 최적 오프셋으로 결정한다.

3.3.2 해프톤 셀 크기 및 각도 정보 추출

오프셋과 동일한 방법으로 해프톤 셀 크기 및 각도에 대한 정보를 추출한다. 셀 크기 및 각도에 대한 탐색구간은 제한된 피크영역을 이용해서 구할 수 있다. 그림 1(c)는 표 4의 셀 크기 및 각도의 최대 최소 값을 이용하면 탐색 구간을 결정할 수 있다. 다음으로 셀 크기 및 각도에 대한 변화율을 결정하는데, 4개의 셀 정보중 오프셋과 셀 각도를 최소 값으로 고정한 상태에서, 셀 크기에 대한 탐색 구간의 차를 이등분 해나가면서 해프톤 셀 중심 위치의 변화를 추적한다. 이때 변경된 해프톤 셀 중심이 전체 해프톤 셀 중심 수의 10%이하일 때를 적절한 셀 크기 변화율로 결정한다. 셀 각도를 최대 값으로 고정한 상태에서 같은 과정을 반복해서 구한 두 개의 변화율 중 보다 작은 값을 셀 크기에 대한 변화율로 결정한다. 셀 각도에 대한 변화율도 동일한 방법으로 결정한다. 그림 13은 셀 크기에 대한 변화율을 감소시키면서 셀 중심 화소의 변화를 나타낸 것이다. 셀 크기나 셀 각도의 변화율이 작을수록 셀 중심 화소의 위치 변화가 작아서, 에너지 변화가 미세하므로 보다 정확한 셀 정보를 판정할 수 있으나 탐색횟수 증가에 대한 부담이 발생한다. 해프톤 셀 크기와 각도에 대한 탐색 구간 및 변화율이 결정되면, 에너지가 최소로 되는 해프톤 셀 크기 및 각도를 결정할 수 있다. 이 과정은 오프셋, 셀 크기 및 각도를 동시에 변경시키면서 최소 에너지를 구한 것이 아니므로 최적의 셀 정보로 판정하기에는 부적절 하다. 따라서 이 과정을 1차 탐색으로 하고, 이 결과를 이용해서 보다 제한된 탐색구간과 세밀한 변화율에 의한 4차원 공간의 탐색을 통해 최적의 셀 정보를 추출할 필요가 있다. 이것을 상세 탐색

(a) 초기 셀 크기를 이용한 셀 중심 (b) 셀 크기 변화율 : 0.093507 (c) 셀 크기 변화율 : 0.046754

(d) 셀 크기 변화율 : 0.023377 (e) 셀 크기 변화율 : 0.011688 (f) 셀 크기 변화율 : 0.0058442

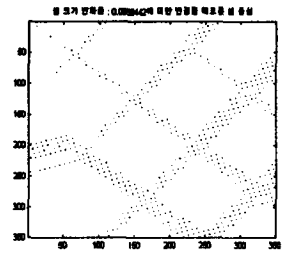



그림 13. 셀 크기 변화율에 따라 변경된 셀 중심

이라고 한다.

3.4 상세 탐색에 의한 해프톤 셀 정보 최적화

1차 탐색결과 구해진 해프톤 셀 정보는 차원 분해의 방법을 이용하였으며, 또한 탐색 구간을 일정 간격으로 등분해서 변화율을 정했기 때문에 최적의 셀 크기, 각도 및 오프셋이 변화율 간격 내에 존재할 수 있다. 따라서 1차 탐색에서 구해진 셀 정보±변화율을 상세 탐색구간으로 정하고, 1차 탐색시 변화율의 1/2~1/4을 상세 탐색시의 변화율로 조정하여 4차원 공간에 대한 정밀한 탐색을 통해 최적의 해프톤 셀 정보를 얻을 수 있다. 그림 14는 최적의 해프톤 셀 정보를 추출하는 과정을 단계적으로 나타낸 것이다.

4. 실험 및 토의

칼라 인쇄물을 600dpi, 24bit 칼라로 스캐닝한 영상에서 Cyan 채널을 실험영상(그림 15(a),그림 16(a))으로 이용하였다. 그림 15의 실험영상은 해프톤 셀 크기가 비교적 작은 경우이며, 그림 16의 실험영상은 해프톤 셀 크기가 큰 경우의 예이다.

에너지 최소화에 의해 추출된 정보를 이용해서 해프톤 셀 중심을 구하면, 해프톤 도트 중앙에 해프톤 셀 중심이 위치함을 알 수 있다. 그림 15(d)-(f)와 그림 16(d)-(f)는 정수 피크좌표에 의한 해프톤 셀 정보, 영상공간의 1차 탐색 및 상세 탐색에 의한 해프톤 셀 정보를 이용해서 해프톤 셀 중심을 구한 결과영상의 일부영역을 확대한 것으로서, 상세 탐색에 의한 해프톤 셀 정보를 이용한 경우에 보다 정확한 해프톤 셀 중심을 구할 수 있음을 알 수 있다. 그림 15(g)-(i) 및 그림 16(g)-(i)는 평활화된 결과 영상에서 경계영역을 포함하고 있는 부분을 확대하여 해프톤 셀 정보의 정확도에 따른 평활화 성능을 비교한 것으로서, 해프톤 셀의 크기가 큰 경우에 보다 정확하게 해프톤 셀 정보를 추출해야 할 필요성을 확인할 수 있다. 한편, 해프톤 셀 크기가 작은 경우에는 1차 탐색과 상세 탐색의 해프톤 셀 중심의 위치 및 평활화 성능이 거의 동일하므로, 상세 탐색 과정은 생략할 수도 있음을 알 수 있다.

그림 15(j)는 오프셋이 고정된 상태에서 셀 크기

최적의 해프톤 셀 정보 추출 과정

[1단계] 피크 형태 분석 및 피크 모델링
- a) 피크 모델별 피크 좌표 계산
- b) 정수 피크에 의한 초기오프셋 및 피크 좌표별 셀 크기, 각도 계산

[2단계] 피크 모델링 결과를 이용한 오프셋 결정
- a) 오프셋의 탐색 구간과 변화율 결정
- b) 초기 오프셋과 1단계-b)의 셀 크기와 각도를 이용한 에너지 계산
- c) b)에서 최소 에너지 상태의 셀크기 및 각도 고정
- d) 셀 크기 및 각도가 고정된 상태로 오프셋을 변화시키면서 에너지 계산
- e) 최소에너지가 되는 오프셋 결정
- f) 오프셋±변화율과 변화율/2을 새로운 탐색구간 및 변화율로 설정한 후 에너지 재계산
- g) 1차 탐색에 의한 오프셋 결정

[3단계] 고정된 오프셋을 이용하여 셀 크기 및 각도 결정
- a) 셀 크기 및 각도의 탐색구간과 변화율 결정
- b) 셀 크기 및 각도를 변화시키면서 에너지 계산
- c) 1차 탐색에 의한 셀 크기 및 각도 결정

[4단계] 오프셋, 셀 크기 및 각도에 대한 탐색구간 및 변화율을 세분하여 상세 탐색
- a) 셀 크기, 각도 및 오프셋의 탐색구간 조정 및 변화율 세분
- b) 오프셋 x0, y0, 셀 크기 및 각도를 변화시키면서 에너지 계산
- c) 최적의 오프셋, 셀 크기 및 각도 결정

그림 14. 최적의 해프톤 셀 정보 추출 방법

(a) 실험영상

(b) C 채널영상

(c) 평활화된 C 채널영상

(d) 정수 피크

(e) 1차 탐색

(f) 상세 탐색

(g) 정수피크

(h) 1차 탐색

(i) 상세 탐색

(j) 1차 탐색시 에너지 변화

(k) 상세 탐색시 에너지 변화

그림 15. 정확한 해프톤 셀 정보를 이용한 해프톤 셀 중심 추출 결과

(a) 실험영상

(b) C 채널영상

(c) 평활화된 C 채널영상

(d) 정수 피크

(e) 1차 탐색

(f) 상세 탐색

(g)

(h)

(i)

그림 16. 셀 크기가 큰 경우의 해프톤 셀 중심 추출 결과 비교

및 각도의 탐색구간에 대한 에너지 변화를 보인 것이고, 그림 15(k)은 4차원 탐색공간에 대한 에너지 변화를 나타내고 있는데, 내부의 작은 블록은 셀 크기 및 각도의 상세 탐색 구간에 대한 에너지 변화이며, 반복되는 내부 블록은 오프셋 변화에 따른 에너지 변화를 나타낸다. 그림 15(j),(k)에서 최소 에너지 위치가 탐색공간의 중심위치에 있는 것을 보아 탐색 구간이 적절함을 알 수 있다. 표 7은 오프셋 차원과 셀 크기

표 7. 그림 15(a)에 대한 탐색횟수 비교

셀 정보		탐색구간		변화율	탐색횟수		
		최소값	최대값		단일차원	차원분해전	차원분해후
오프셋	x0	0.4764	2.1329	0.6	3	13,068	1,101
	y0	0.2411	2.1329	0.5	4		
셀 크기		4.2374	4.2658	0.000886	33		
셀 각도		74.6536	75.0802	0.01334	33		

및 각도 차원을 분해함으로써 연산량이 감소하는 것을 나타내고 있다.

5. 결론 및 향후연구

역 해프토닝의 성능을 높이기 위해서는 정확한 평활화 마스크의 설계가 중요함을 보이고, 영상공간에서의 해프톤 셀 중심의 밝기 값의 평균을 최소화함으로써 정확한 해프톤 셀 정보를 추출하는 방법을 제안하고 그 타당성을 밝혔다. 또한, 차원분해 기법을 적용하여 해프톤 셀의 크기, 각도, 오프셋을 신속하게 구하는 휴리스틱한 방법도 제안하였다. 이를 위해, 퓨리에 공간에서의 피크 형태를 분석하여 피크가 존재할 제한된 영역을 추정하고, 직선 함수, 가우시안 함수 및 지수 함수로 피크 형태를 모델링하여 탐색에 따른 연산부담을 감소시키는 방법을 사용하였다. 실험을 통해, 제안한 방법으로 정확한 해프톤 셀 정보를 구함으로써 역 해프토닝된 영상의 질을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

향후, 제안한 방법에 의해 추출된 해프톤 셀 중심 정보는 칼라 해프톤 영상의 채널분리 및 모아레 패턴의 존재 여부 판정에 이용하여, 역 해프토닝 성능을 보다 향상시키는데 활용할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Ulchiny, *Digital Halftoning*, MIT Press, U.S.A, 1990.

[2] J. C. Russ, *The Image Processing Handbook*, 3rd Ed., CRC press, U.S.A., 1999.

[3] J. Rydenius, "Inverse Halftoning of Scanned Colour Images," Master Thesis, Dept. of Elect. Eng. ,Linkoping University, Sweden, 1997.

[4] Y. T. Kim and G. R. Arce, "Inverse ordered dithered halftoning using permutation filters," IEEE ICIP, Vol. 2, pp. 1017-1021, 1994.

[5] L. M. Chen and H. M. Hang, "Inverse Halftoning for monochrome picture," IEEE ICIP, Vol. 2 pp. 1022-1026, 1994.

[6] Foley, VanDam, Feinei and Hughes, *Computer Graphics*, Addison Wesley, 2nd Ed., U.S.A, 1990.

[7] R. L. Stevenson, "Inverse Halftoning via MAP estimation," IEEE Trans. of Image Processing, Vol. 6, No. 4, pp. 574-583, 1995.

[8] H. R. Kang, *Color Technology for Electronic Imaging Devices*, SPIE Optical Engineering Press, U.S.A, 1996.

[9] 김종민, 김민환, "칼라 역 해프토닝을 위한 새로운 평활화 마스크의 설계," 한국 멀티미디어학회 논문지, 제1권, 제2호, pp. 183-193, 1998.

[10] 김종민, 김민환, "새로운 평활화 마스크를 이용한 칼라 역 해프토닝," 한국멀티미디어학회 춘계학술 발표 논문집, 제1권, 제1호, pp. 148-153, 1998.

[11] 김종민, 김민환, "Clustered-dot 방법으로 해프톤된 인쇄물에 대한 칼라 역 해프토닝 방법," 한국멀티미디어 학회 논문지, 제2권, 제3호, pp. 308-319, 1999.

[12] J. M. Kim, J. Y. Byun and M. H. Kim, "Color Inverse Halftoning Method for Scanned Color Images," Proceedings of SPIE, Vol. 3963, pp. 240-249, 2000.

한 영 미

1983년 경북대학교 전자공학과 학사
1983년~1990년 현대중공업
1994년 포항공과대학교 정보통신대학원 석사
1996년~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정
관심분야 : 화상처리, 칼라공학

김 민 환

1980년 서울대학교 전기공학과 학사
1983년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 석사
1988년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사
1991년~1992년 Univ. of Washington 객원연구원
1986년~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 화상처리 및 이해, 칼라공학